中国生态农业学报 2016 年 12 月 第 24 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2016, 24(12): 1683−1692

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160573

河北省冬小麦生产空间格局及其控制因素*

赵稷伟 王锡平** 杜汛雨 尚志云

(河北师范大学资源与环境科学学院/河北省环境演变与生态建设实验室 石家庄 050024)

摘 要 在气候变化与水资源短缺的背景下，华北平原冬小麦生产面临巨大的挑战，明确冬小麦生产的空间格局及其控制因素，可为本区冬小麦的科学规划管理决策和高效生产提供依据。基于河北省各县市 2004—2013 年冬小麦单位面积产量与农情资料，以主产区(以县市平均冬小麦播种面积大于总播种面积的 20%为标准选取)101 个县市为基本研究单元，采用系统聚类分析对河北省冬小麦主产区进行区域划分；利用因子分析方法对冬小麦生产要素进行主成分分析，并利用逐步回归分析方法建立冬小麦产量与主要控制因素主成分之间的关系。结果表明，河北省冬小麦主产区分为 4 个(Ⅰ~Ⅳ)，各区冬小麦产量水平从Ⅰ区向Ⅳ区依次递减，产量变异依次增大，且各区差异均达显著水平(P<0.05)。冬小麦产量(Y)与化肥因子(F_1)、灌溉因子(F_3)、年降水量因子(F_4)、年降水量下限因子(F_5)有显著的线性回归关系(R^2=0.685, P<0.05)，其中 F_1、F_3 分别解释了 Y 的 21.7%、37.4%, F_4、F_5 解释了 Y 的 9.4%。据此说明灌溉是影响河北省冬小麦产量区域差异的首要因素，其次是化肥使用量，而年降水量对产量区域差异影响较小。农药因子(F_2)的回归效应不显著，说明冬小麦病虫害发生及防治具有区域随机性变化特点，对冬小麦生产的区域差异不形成显著影响。另外，全省冬小麦播种面积比重与产量水平有较好的区域吻合度(R^2=0.409, P<0.05)，说明在现有管理模式下冬小麦区域布局基本合理，只是在东部低平原沿海的极个别低产县的播种面积明显偏高，结合冬小麦对灌溉条件的依赖性，认为这些县市的冬小麦布局需要慎重审视。

关键词 冬小麦 空间格局 产量变异 灌溉 控制因素 河北省
中图分类号: S512.1+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)12-1683-10

Spatial structure and control factors of winter wheat production in Hebei Province*

ZHAO Jiwei, WANG Xiping**, DU Xunyu, SHANG Zhiyun

(College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University / Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract Winter wheat is one of the most important staple crops in the North China Plain. With intensifying challenges of climate change and water shortage, the need for sustainable and high efficiency winter wheat production is becoming more pressing. Clear understanding of the control factors of wheat production can provide the necessary basis for the regulation of a smart winter wheat production policy. Hebei Province is one of the major winter wheat production regions in North China. Annual records (2004–2013) of wheat yield and agricultural information for each county in the province were used to analyze the spatial distribution of yield variation of winter wheat along with the control factors. The major winter wheat production area (which consists of 101 counties with winter wheat area greater than 20% of total cropping area of the county) in Hebei Province was selected and divided into 4 zones (Ⅰ–Ⅳ) using hierarchical clustering analysis based on maximum, minimum

* 河北省自然科学基金项目(D2014205159)、国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA122101)资助
** 通讯作者: 王锡平，主要从事气候变化与农业生产系统模拟和分析研究。E-mail: wangxp@mail.hebtu.edu.cn
赵稷伟，主要从事农作生产系统的模拟与分析。E-mail: 1603126765@qq.com
收稿日期: 2016−06−27 接受日期: 2016−09−12

* This study was supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (D2014205159) and the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China (2013AA122101).
** Corresponding author, E-mail: wangxp@mail.hebtu.edu.cn
Received Jun. 27, 2016; accepted Sep. 12, 2016

and average yields. A principal component analysis was conducted using the average and variation indexes (minimum, maximum, bottom and top boundaries of the 95% confidence interval) of the agricultural variables for winter wheat production, including irrigated area, fertilizer and pesticide amount as well as annual rainfall in each county. Five derived principal factors represented fertilizer (F_1), pesticide (F_2), irrigation (F_3), annual rainfall (F_4) and minimum rainfall (F_5). Based on the factor score values of the factor models, a stepwise regression analysis model was developed to assess the spatial variation of winter wheat yield as an independent factor (Y). The results showed that from zone Ⅰ to zone Ⅳ, averaged winter wheat yield decreased, whereby temporal yield variation increased significantly ($P < 0.05$). Zone Ⅰ mostly covered central Hebei Plain including Gaocheng and Luancheng Counties to the east of Shijiazhuang City. Zones Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ diverged from the central to the peripheral of Hebei Plain in that sequence, especially zone Ⅳ which only covered the southwest and northeast corner with the lowest yield and the highest variation. Model analysis showed that Y was significantly correlated with F_1, F_3, F_4 and F_5 ($R^2 = 0.685$, $P < 0.01$) and these factors explained 68.5% of Y, where irrigation (F_3) was the most important factor explaining 37.4% and fertilizer (F_1) explaining 21.7%. Annual rainfall F_4 and F_5 together explained only 9.4% of the whole model result, indicating a minor effect of annual rainfall on the spatial distribution of winter wheat production in Hebei Province. Pesticide (F_2) was not factored into the Y regression model, showing that the use of pesticide had no significant effect on winter wheat production. It underlined the point that plant diseases and pests happened at random and with no regional tendency in winter wheat production. Regression analysis on winter wheat yield and the ratio of winter wheat area to total cropped area (F_6) showed that F_6 coincidently varied with winter wheat yield among different counties ($R^2 = 0.409$, $P < 0.05$). Only a few counties to the far east of the low plain close to the coast belonging to zone Ⅳ with the lowest winter wheat yield but abnormally high F_6. The results showed that winter wheat production was basically more proper under the existing management mode. However, under severe water shortage conditions, the abnormally high F_6 value with low yield spots needed careful examination to insure a healthy and sustainable high-efficiency cropping system. Otherwise winter wheat production should be reduced in low yield areas because irrigation was the most important controlling factor of production. Nevertheless, in this study, only 68.5% of the production variables were explored. This implied that there were other factors not only taken into account in the analysis but also affected winter wheat production.

Keywords Winter wheat; Spatial structure; Yield variation; Irrigation; Control factor; Hebei Province

华北平原是我国三大小麦集中产区之一。而河北省位于华北平原腹地，是我国重要的传统农业大省，近年来小麦种植面积保持 240 万 hm^2，总产量达 1 200 万 t，播种面积和产量均占全国的 10%，其小麦生产对全国粮食生产有着重要意义[1]。多项研究表明，在灌溉条件下，黄淮海地区冬小麦生产优势是高产、稳产，品质良好[2−6]。但该区地处大陆性季风气候区，气候要素时空变异大，平均年降水量 450~550 mm，不能满足小麦生育期需水要求，小麦生产严重依赖于灌溉补给，长期抽取地下水灌溉导致该区成为全国最大的地下漏斗区[7]。在气候变化和水资源短缺的背景下，明确冬小麦生产空间格局及其控制因素，合理布局和指导生产规划，对本地区粮食生产及资源可持续利用具有重要意义。徐志宇等[8]利用粮食生产重心模型与粮食生产内外部驱动因素分析模型，分析了近 30 年全国小麦生产格局变化特征及其驱动因素，结果表明播种面积是影响小麦生产的关键驱动要素，总人口、有效灌溉面积、农业机械总动力、化肥投入量等对小麦生产都存在显著影响。莫兴国等[9]利用基于过程的土壤−植被−大气系统物质传输和作物生长的耦合模型分析了黄淮海地区冬小麦产量时空分布及其驱动机制，结果表明本地区冬小麦产量有明显空间分异特征，并与灌溉条件和土壤密切相关。王勇[10]利用比较优势模型并结合空间计量经济学模型分析黄淮海地区小麦布局的演变特征，指出该区小麦产量在空间上向河南中东部及安徽北部集聚明显，有效灌溉面积比例、人均耕地面积、单位面积耕地农机总动力、劳动力非农就业比例对小麦产量有正向影响。王千等[11]利用 GIS 与空间相关分析理论相结合的方法分析表明，近年来播种面积、农药施用量对粮食产量的重要程度加大，有效灌溉面积、化肥使用量、农业机械动力、农用排灌机械动力等因素仍然是影响粮食产量的主要因素。张路路等[12]利用空间自相关模型分析了河北省 136 个县近 20 年资料，分析表明有效灌溉面积保证率、单位面积农药使用量、单位劳动力投入、单位面积化肥使用量是影响粮食产量格局变化的主要因素。白立佳等[13]的结果则表明有效灌溉面积、单位面积劳动力投入和粮食收购价格指数等是影响粮食单产格局变化最为主要的因素。王玉倩[14]利用 GIS 以及回归分析理论对河北省 20 年粮食作物投入产出时空格局及其影响因素进行分析，结果表明保定市的年均粮食产量最多，秦皇岛产量最低，空间分布基本呈现中南部高、北部低的格局，

投入要素中化肥使用量、粮食播种面积、有效灌溉面积和农机总动力对粮食产量影响显著。刘中培等[15]对河北省粮食高产、主产区的石家庄平原地区近 30 年化肥使用量与粮食产量之间关系的研究中指明，随着施肥量增加，该地区小麦–玉米产量增长 2.18 倍。这些研究结果使我们对河北省总的粮食和黄淮海冬小麦的生产空间格局及其控制因素都有了较概括的了解，但对面临巨大挑战的河北省冬小麦作物的生产格局及其控制因素的研究尚少见报道。因此本文以河北省冬小麦主产区 101 个县为区域单元，基于聚类分析、因子分析和回归分析等多元统计分析方法，剖析河北省冬小麦生产区域格局及其控制因素规律，分析其现有布局的合理性及存在问题，为冬小麦高效生产及科学规划管理提供依据。

1　材料与方法

1.1　资料及来源

冬小麦单位面积产量受自然因素和人为因素共同影响，温度、降水、光照等自然因素主要由某地区自然地理特征决定；品种、灌溉和肥料等生产投入要素主要受人类活动的影响[16]。近 10 年来我国北方气候呈现干旱趋势，但是通过生产投入增加等人为因素的作用，在一定程度上缓解了气候变化对冬小麦生产的负面影响[17]。品种更新促使冬小麦产量增幅 20%以上，是影响冬小麦生产的主要投入要素之一[18–19]，但是由于统计资料的缺乏，并且本文主要进行区域分布规律的分析，可假设品种更替在各个区域接近时间同步，所以本文暂时没有考虑品种改良效应在各县的差异，忽略了品种的效应影响。因此本文选择化肥使用量、灌溉面积比重、农药使用量、年降水量等作为影响冬小麦产量的农情要素。

本文分析数据为河北省各县市逐年的农作物化肥使用量(折纯量)、农作物农药使用量、农作物有效灌溉面积、冬小麦播种面积，及各对应县市的年降水量，时间长度为 2004—2013 年，各县农情数据摘自《河北农村统计年鉴》[20]，年降水量(AR)来自气象数据共享服务网提供的标准气象数据。

为了进一步消除各要素变化因总耕地面积不同而导致的干扰，将各县农情要素值(冬小麦单产除外)除以农作物总播种面积，分别得到冬小麦播种面积比重(ARW)、灌溉面积比重(AI)、单位面积化肥使用量(XF)和单位面积农药施用量(DDT)。

河北省冬小麦生产主要集中分布于中南部平原区，北部张家口、承德地区极少种植。为消除因冬小麦种植比例太低而造成的统计干扰，本文仅选择冬小麦播种面积比重超过 20%的 101 个县市，如图 1 所示。

1.2　变化特征

本文采用变异系数和置信区间来反映冬小麦产量及其化肥使用量、灌溉面积比重、农药使用量、年降水量等要素的变异性。变异系数(υ)即标准差与平均值的比值[21]见公式(1)。

$$\upsilon = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2 \Big/ (n-1)}}{\bar{x}} \tag{1}$$

式中：υ 表示某个要素变量的变异系数，$\bar{x}$ 表示变量的平均值，x_i 表示第 i 个实际值，n 表示资料时长。变异系数越大，表示该变量变化越大。

另外，还利用 95%置信区间的上、下限和均值表示变量变异大小。上下限差异越大，表明该变量变化性越大。

1.3　数据分析方法

1.3.1　利用聚类分析进行冬小麦产量区域划分

聚类分析是依据分类对象的属性指标，将物理或抽象对象的集合分组为由类似的对象组成的多个类的分析过程，其目标是在相似性的基础上利用属性数据进行分类[22]。其中的系统聚类分析方法步骤明晰、结果直观，被广泛用于不同类型的区域划分研究中[23–24]。基本思想是先将 n 个样品看成 n 类，然后规定样本之间的相似程度和类与类之间的相似程度指标，选择相似程度最近的两类合成一个新类，计算新类和其他类(当前各类)之间的距离，这样每次合并就会减少一类，直至所有样品归为一类为止[25]。

本文以冬小麦单位面积产量的最大值、最小值、均值作为分类指标，通过样本间的欧式距离[见公式(2)]作为其相似程度指标，根据欧式距离矩阵中将距离最近的两个合成一类，同时选用离差平方和法作为聚类指标，最后根据聚类指标差异得到最终分类结果。

$$D_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left(x'_{ik} - x'_{jk}\right)^2} \tag{2}$$

式中：D_{ij} 表示 i 县与 j 县单位面积产量相似性系数；x'_{ik} 表示 i 县 k 指标标准化值；x'_{jk} 表示 j 县 k 指标标准化值；n 表示研究区县指标总数。

1.3.2　产量区域差异控制因素的因子分析方法

因子分析法是指研究从变量群中提取共性因子的统计技术，通过研究众多变量之间的相互关系，依据实测变量间存在的公共相关信息表达成一系列相互独立的隐含变量，即公共因子[26–27]。

设有 n 个样本，每个样本有 p 个观测变量，原始

变量用 $X=(x_1, x_2, \cdots, x_p)$表示，公共因子用 $F(F_1, F_2, \cdots, F_m)(m<p)$表示。因子分析的模型[28]可表示为：

$$\begin{cases} X_1 = a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \cdots + a_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\ X_2 = a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + \cdots + a_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\ X_p = a_{p1}F_1 + a_{p2}F_2 + \cdots + a_{pm}F_m + \varepsilon_p \end{cases} \tag{3}$$

式中：$F_1, F_2, \cdots, F_m$为公共因子，他们相互独立且不可观测，是每个原始观测变量都隐含信息的因子；a_{ij}为因子载荷，a_{ij}的绝对值越大，表示F_j对X_i的依赖程度越大，即F_j对X_i包含的信息量越大；ε为特殊因子，代表公因子以外的影响因素所致的变量变异。

本文选取各产量区域化肥使用量、灌溉面积比重、播种面积比重、年降水量、农药使用量等要素及冬小麦产量，利用其所在分析期间(2004—2013年)的均值、95%置信区间上、下限以及极大值和极小值构建各要素指标体系。采用因子分析的方法提取主成分因子，并采用最大方差法对因子载荷矩阵进行正交旋转以使因子更加容易被解释；最终根据各主成分得分系数矩阵建立冬小麦产量和各要素因子模型。

1.3.3 冬小麦产量与控制因素之间的逐步回归分析

根据上述因子分析结果建立的综合因子模型，引入实际数值，计算得到冬小麦产量因子和各要素因子的各县市得分值[29]。并以产量因子为因变量，各要素因子为自变量，进行逐步回归分析[30]，建立冬小麦产量综合变化与有显著影响的控制因素之间的关系模型。

1.4 软件环境

数据的整理、图表的绘制用 Microsoft Excel 2010 完成，数据分析用 SPSS.19 完成，河北省冬小麦生产空间分布图由 Arcgis 10.0 制作。

2 结果与分析

2.1 河北省冬小麦生产空间格局

利用系统聚类分析方法进行冬小麦产量区域划分，根据树状图结果，结合各步骤类间距离差异性和冬小麦生产区域特点，将河北省冬小麦主产区划分4个，Ⅰ区主要分布在石家庄各县，其他各区以Ⅰ区为中心向四周辐射分布(图1)。

从冬小麦生产各分区的冬小麦产量描述性统计(表1)和各县市产量变化趋势(图2)看出，冬小麦产量以Ⅰ区最高，其中赵县、藁城市、正定县、栾城县等县市产量最高，平均7 000 kg·hm^{-2}以上；Ⅱ区冬小麦产量与Ⅰ区相差1 034 kg·hm^{-2}，是第二高产区；Ⅳ区平均产量最低，只有Ⅰ区的50%，此区总产也仅占全省冬小麦产量的17%。说明冬小麦生产

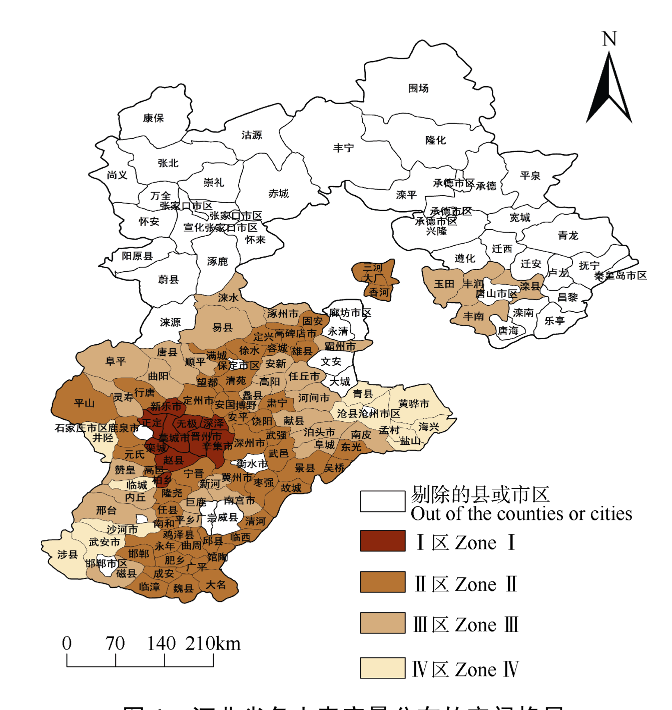


图1 河北省冬小麦产量分布的空间格局
Fig. 1 Spatial structure and regionalization of winter wheat yield in Hebei

主要集中在Ⅰ~Ⅲ区，占全省冬小麦产量的83%，并且呈现出从Ⅰ区向Ⅳ区依次递减的趋势。各区产量变异表现为有规律地随平均产量的增加而减小，Ⅰ区产量最稳定，Ⅳ产量变异最大。

运用单变量方差分析中LSD多重比较法进行对比分析的结果表明，各分区之间冬小麦产量水平差异显著($P<0.01$)；除Ⅱ区与Ⅲ区产量变异系数差异不显著($P>0.05$)外，其他各区之间变异系数的差异也都达到显著水平($P<0.01$)。

综上可知，高产的Ⅰ区位于太行山前平原中心地区，以石家庄各县为主，该区地势平坦，土壤肥沃，农业生产的基础设施完善；次高产的Ⅱ区围绕Ⅰ区分布在平原地带；较低产的Ⅲ区分布在西部太行山山地地区和华北平原东北部；低产且不稳定的Ⅳ区分布在河北省西南角和东北角。

2.2 河北省冬小麦生产空间格局分布的控制因素分析

2.2.1 冬小麦产量及其控制因素的因子分析

对本文所选要素化肥使用量、灌溉面积比重、播种面积比重、年降水量和农药施用量的均值及变化指标构成的指标体系(包括均值、95%置信区间下限、95%置信区间上限、最小值、最大值)进行因子分析。按照特征值大于1，累计方差贡献率大于85%的原则，共提取5个主成分，累计方差贡献率达95.022%，详见表2。从各主成分的载荷矩阵(表3)中各载荷大小可看出，主成分1主要为化肥使用量

表 1　河北省不同冬小麦产区产量变化情况比较

Table 1　The basic descriptive statistics of winter wheat yield in different production zones of Hebei Province

变量 Variable	Ⅰ区 Zone Ⅰ	Ⅱ区 Zone Ⅱ	Ⅲ区 Zone Ⅲ	Ⅳ区 Zone Ⅳ
平均产量 Average yield (kg·hm^{-2})	7 124.70	6 090.50	5 269.90	3 981.90
变异程度 Degree of variation (%)	3.12	5.79	6.07	13.29
最大值 Maximum value (kg·hm^{-2})	7 370.60	6 629.62	5 717.59	4 574.14
最小值 Minimum value (kg·hm^{-2})	6 628.01	5 680.25	4 841.97	3 220.35
95%置信区间上限 Upper limit of 95% confidence interval (kg·hm^{-2})	7 283.07	6 341.20	5 498.30	4 316.70
95%置信区间下限 Lower limit of 95% confidence interval (kg·hm^{-2})	6 966.39	5 839.74	5 041.40	3 647.14

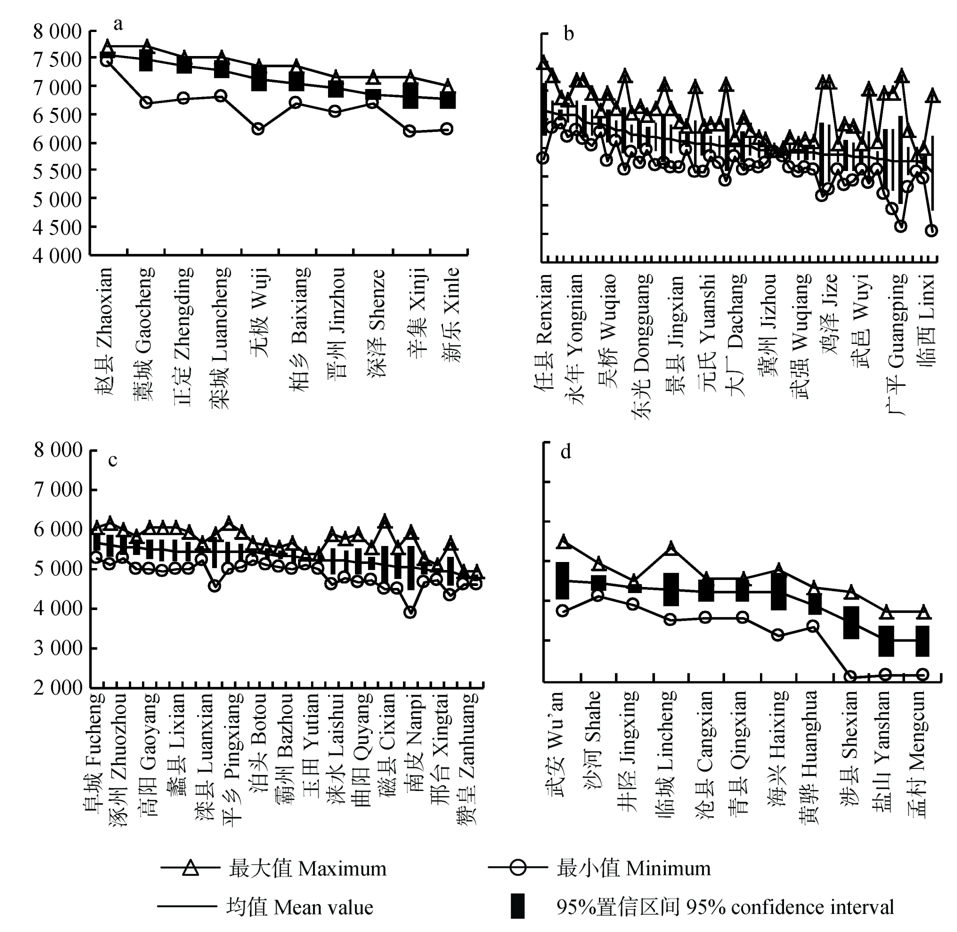


图 2　河北省不同冬小麦生产区各县市产量变化趋势[Ⅰ区(a)、Ⅱ区(b)、Ⅲ区(c)、Ⅳ(d)]

Fig. 2　Change trends of winter wheat yield of each county of different winter wheat production zones in Hebei Province [Zone Ⅰ (a)、zone Ⅱ (b)、zone Ⅲ (c)、zone Ⅳ (d)]

表 2　河北省冬小麦产量控制要素主成分分析及其贡献率

Table 2　Principal component analysis of yield-controlling factors and the eigenvalues of winter wheat in Hebei Province

因子 Factor	初始特征值 Initial eigenvalue			提取平方和载入 Extraction sums of squared loadings			旋转平方和载入 Rotation sums of squared loadings		
	原始值 Eigen value	贡献率 Contribution rate (%)	累积贡献率 Cumulative percentage (%)	原始值 Eigen value	贡献率 Contribution rate (%)	累计贡献率 Cumulative percentage (%)	原始值 Eigen value	贡献率 Contribution rate (%)	累积贡献率 Cumulative percentage (%)
1	8.244	41.219	41.219	8.244	41.219	41.219	4.923	24.616	24.616
2	4.450	22.248	63.467	4.450	22.248	63.467	4.721	23.605	48.221
3	3.130	15.650	79.117	3.130	15.650	79.117	4.629	23.143	71.365
4	2.137	10.686	89.804	2.137	10.686	89.804	2.554	12.768	84.133
5	1.044	5.219	95.022	1.044	5.219	95.022	2.178	10.889	95.022

表 3　河北省冬小麦产量控制因素的主成分载荷矩阵

Table 3　Load matrix of the principal components of the yield-controlling factors of winter wheat in Hebei Province

指标 Index	主成分载荷 Principal components load matrix				
	化肥因子(F_1) Fertilizer use	农药因子(F_2) Pesticide use	灌溉面积因子(F_3) Irrigation area factor	年降水因子(F_4) Annual rainfall factor	年降水下限因子(F_5) Lower limit of annual rainfall factor
XF_{mean}	0.949	0.136	0.274	−0.038	0.002
XF_{95L}	0.946	0.124	0.286	−0.029	−0.010
XF_{95H}	0.944	0.146	0.261	−0.047	0.013
XF_{Min}	0.906	0.155	0.287	−0.037	−0.028
XF_{Max}	0.934	0.181	0.243	−0.046	0.023
AR_{mean}	−0.036	0.022	−0.143	0.770	0.601
AR_{95L}	0.002	−0.009	−0.211	0.353	0.887
AR_{95H}	−0.058	0.042	−0.066	0.947	0.227
AR_{Min}	0.024	0.021	−0.218	0.059	0.917
AR_{Max}	−0.059	−0.015	0.009	0.957	−0.031
AI_{mean}	0.293	0.056	0.940	−0.020	−0.135
AI_{95L}	0.328	0.034	0.906	−0.026	−0.175
AI_{95H}	0.243	0.076	0.946	−0.015	−0.088
AI_{Min}	0.360	0.020	0.825	−0.087	−0.212
AI_{Max}	0.187	0.078	0.910	−0.059	−0.063
DDT_{mean}	0.116	0.990	0.051	0.007	0.006
DDT_{95L}	0.163	0.968	0.102	0.013	−0.019
DDT_{95H}	0.075	0.983	0.010	0.002	0.026
DDT_{Min}	0.255	0.887	0.152	0.018	−0.042
DDT_{Max}	0.071	0.959	−0.045	−0.002	0.046

XF: 冬小麦化肥使用量; AR: 年降水量; AI: 冬小麦灌溉面积比重; DDT: 冬小麦农药施用量; 下标"mean": 均值; 下标"95L": 95%置信区间下限; 下标"95H": 95%置信区间上限; 下标"Min": 最小值; 下标"Max": 最大值; 下同。XF: fertilizer use of winter wheat; AR: annual rainfall; AI: proportion of irrigated area of winter wheat; DDT: pesticide use of winter wheat; subscript "mean": mean of each variation; subscript "95L": the lower limit of 95% confident interval of each variation; subscript "95H": the upper limit of 95% confident interval of each variation; subscript "Min": minimum of each variation; subscript "Max": maximum of each variation. The same below.

的信息，由此可称为化肥因子(F_1)，方差贡献率为41.219%；同理将主成分 2 称为农药因子(F_2)，方差贡献率为 22.248%；将主成分 3 命名为灌溉面积因子(F_3)，方差贡献率为 15.650%；第 4 个主成分中年降水量均值、95%置信区间上限、最大值的载荷系数最大，所以认为是年降水量因子(F_4)，方差贡献率为 10.686%；第 5 个主成分主要是年降水量 95%置信区间下限、年降水量最小值的载荷系数最高，所以将其命名为年降水量下限因子(F_5)，方差贡献率为 5.219%。各主成分的方差贡献率表示每个因子对整个因素系统信息反映程度，从表 2 可知，化肥因子、农药因子和灌溉因子是此要素指标系统中最重要的因子。

根据冬小麦产量控制因素的得分系数矩阵(表 4)中各主成分对应列上的系数，可得到其与要素指标之间的线性关系，如化肥因子 F_1 的因子得分可表示成公式(4):

$$F_1=0.241XF_{mean}+0.240XF_{95L}+0.240XF_{95H}+0.227XF_{Min}+0.237XF_{Max}+0.001AR_{mean}-0.017AR_{95L}+0.014AR_{95H}-0.028AR_{Min}+0.030AR_{Max}-0.073AI_{mean}-0.051AI_{95L}-0.095AI_{95H}-0.024AI_{Min}-0.111AI_{Max}-0.040DDT_{mean}-0.030DDT_{95L}-0.047DDT_{95H}-0.003DDT_{Min}-0.038DDT_{Max} \tag{4}$$

另外，对河北省 2004—2013 年冬小麦产量变化的指标体系进行因子分析，得到 1 个产量综合因子(Y)，其方差贡献率为 95.269%，得到产量因子得分[公式(5)]。

$$Y=0.998Y_{mean}+0.981Y_{95L}+0.989Y_{95H}+0.967Y_{Min}+0.943Y_{Max} \tag{5}$$

2.2.2　冬小麦产量与控制因素的逐步回归分析

以冬小麦产量主成分得分(Y)为因变量，以各生产要素的综合因子得分 F_1(化肥)、F_2(农药)、F_3(灌溉)、F_4(年降水量)和 F_5(年降水量下限)为自变量进行逐步回归分析，得出回归方程[公式(6)]，因为农药因子(F_2)意义不显著，被剔除。

$$Y=0.611F_3+0.466F_1-0.282F_4-0.122F_5 \tag{6}$$

从表 5 回归参数可以看出，该方程决定系数 R^2=0.685，说明化肥因子(F_1)、灌溉面积因子(F_3)、

表 4　河北省冬小麦产量控制因素的得分系数矩阵

Table 4　Component score coefficient matrix of the yield-controlling factors of winter wheat in Hebei Province

指标 Index	主成分得分系数 Component score coefficient				
	化肥因子(F_1) Fertilizer use	农药因子(F_2) Pesticide use	灌溉面积因子(F_3) Irrigation area factor	年降水因子(F_4) Annual rainfall factor	年降水下限因子(F_5) Lower limit of annual rainfall factor
XF_{mean}	0.241	−0.032	−0.074	0.015	−0.019
XF_{95L}	0.240	−0.035	−0.072	0.022	−0.027
XF_{95H}	0.240	−0.029	−0.076	0.008	−0.011
XF_{Min}	0.227	−0.025	−0.067	0.021	−0.033
XF_{Max}	0.237	−0.021	−0.079	0.006	−0.007
AR_{mean}	0.001	−0.004	0.036	0.233	0.177
AR_{95L}	−0.017	−0.010	0.071	−0.050	0.467
AR_{95H}	0.014	0.002	0.002	0.404	−0.073
AR_{Min}	−0.028	−0.001	0.081	−0.206	0.563
AR_{Max}	0.030	−0.011	−0.027	0.490	−0.270
AI_{mean}	−0.073	−0.005	0.259	0.005	0.059
AI_{95L}	−0.051	−0.012	0.234	0.016	0.025
AI_{95H}	−0.095	0.003	0.279	−0.008	0.095
AI_{Min}	−0.024	−0.017	0.194	0.000	−0.001
AI_{Max}	−0.111	0.008	0.282	−0.038	0.122
DDT_{mean}	−0.040	0.222	0.000	−0.006	−0.001
DDT_{95L}	−0.030	0.213	0.004	0.005	−0.015
DDT_{95H}	−0.047	0.223	−0.004	−0.014	0.009
DDT_{Min}	−0.003	0.189	0.001	0.017	−0.030
DDT_{Max}	−0.038	0.217	−0.019	−0.019	0.014

表 5　河北省冬小麦产量与控制因素之间回归方程的相关参数

Table 5　Correlative parameters of regressive equations of winter wheat yield and controlling factors in Hebei Province

变量 Variable	回归系数 Regressive coefficient	标准化系数 Standardized coefficient	*P* 值 *P* value	R^2	方程 *P* 值 *P* value of regressive equation	统计量 Statistical magnitude
常量 Constant	3.641E-8		1.000	0.685	0.000	52.242
F_3	0.611	0.611	0.000			
F_1	0.466	0.466	0.000			
F_5	−0.282	−0.282	0.000			
F_4	−0.122	−0.122	0.036			

年降水量因子(F_4)与年降水量下限因子(F_5)共同决定了冬小麦产量及变异信息的 68.5%。其中灌溉因子(F_2)是最重要因子，决定了产量变化 37.4%的信息；其次化肥因子、年降水量因子和年降水量下限因子分别决定 21.7%、7.9%和 1.5%。此结果也说明降水量对河北省冬小麦区域分布的影响比较小。

2.3　河北省冬小麦生产要素区域差异分析

2.3.1　灌溉面积比重区域差异分析

从表 6 可知，各区的平均灌溉面积比重均超过 50%，其中Ⅰ区最大，Ⅳ区最小，并且各区域间差异显著($P<0.01$)；变异程度Ⅰ区最小、Ⅳ区最大，各区域间差异显著($P<0.01$)。尤其是灌溉面积比重位居全省前列的赵县、藁城、正定、深泽、晋州等县市均在Ⅰ区，平均灌溉面积比重在 95%以上。这些变化与冬小麦

表 6　河北省各冬小麦生产区产量控制因素变异大小的比较

Table 6　Contrast of the variation of yield-controlling factors of winter wheat in different production zones in Hebei Province

区域 Zone	灌溉面积比重 Proportion of irrigated area (%)	化肥使用量 Fertilizer use (kg·hm^{-2})	年降水量 Annual rainfall (mm)
Ⅰ区 Zone Ⅰ	98±3.11	953.02±7.33	512.37±19.42
Ⅱ区 Zone Ⅱ	88±4.46	624.24±6.78	514.67±19.25
Ⅲ区 Zone Ⅲ	77±11.36	496.33±8.72	531.16±19.90
Ⅳ区 Zone Ⅳ	57±12.22	139.35±12.74	559.62±15.07

表中数据为均值±变异系数。The values are mean ± coefficient of variation.

平均产量和变异趋势(表 1)一致，说明灌溉面积比重在河北省冬小麦生产布局和产量变化中的重要作用。

2.3.2 化肥使用量与年降水量区域差异分析

冬小麦化肥使用量介于 192.11~1 628.21 kg·hm^{-2}，按照各区平均化肥使用量进行排序：Ⅰ区>Ⅱ区>Ⅲ区>Ⅳ区；按照各区化肥使用量变异系数进行排序：Ⅱ区<Ⅰ区<Ⅲ区<Ⅳ区(表 6)，并且各区域间的平均化肥使用量和变异系数的差异均达到显著水平(P<0.01)。化肥使用量最多的县多集中在Ⅰ区，这些县市冬小麦产量和灌溉面积比重在全省位于前列，说明化肥使用量也与冬小麦产量的区域分布趋势一致。从表 6 可知，各区间年降水量变异差异不显著(P>0.05)，平均降水量Ⅰ区最少，Ⅳ区最多，各区域间平均年降水量差异显著(P<0.05)，呈现出Ⅰ区向Ⅳ区依次递增的趋势，与各区产量变化趋势相反。说明年降水量对冬小麦产量区域差异影响较小，可能被灌溉能力和施肥量作用掩盖。

2.4 冬小麦产量与播种面积比重

从表 7 可知，各区平均播种面积比重排序为Ⅰ区>Ⅱ区>Ⅳ区>Ⅲ区，并且各区间差异均达到显著水平(P<0.05)。各区播种面积比重变异系数排序为Ⅰ区<Ⅱ区<Ⅲ区<Ⅳ区，但差异均未达显著水平(P>0.05)。

表 7 河北省不同区域冬小麦平均播种面积比重与变异系数的比较

Table 7 Contrast of the average and variation of proportion of sowed area of winter wheat in different production zones in Hebei Province

变量 Variable	Ⅰ区 Zone Ⅰ	Ⅱ区 Zone Ⅱ	Ⅲ区 Zone Ⅲ	Ⅳ区 Zone Ⅳ
平均播种面积比重 Average proportion of sowed area (%)	70	56	43	52
变异系数 Coefficient of variation (%)	8.13	8.38	10.82	13.01

从各区播种面积比重与产量关系(图 3)可以看出，两者线性关系达到显著水平(R^2=0.141，P<0.05)，即产量低的县市其播种面积比重较小的趋势。但也可以看出，Ⅳ区平均产量最低，变异系数最大，而沧县、黄骅市、盐山县、孟村、涉县、海兴县等低产县市却出现了播种面积较大的现象。当剔除 6 个异常县时，线性关系显著性大大改善，决定系数 R^2=0.409(P<0.05)。

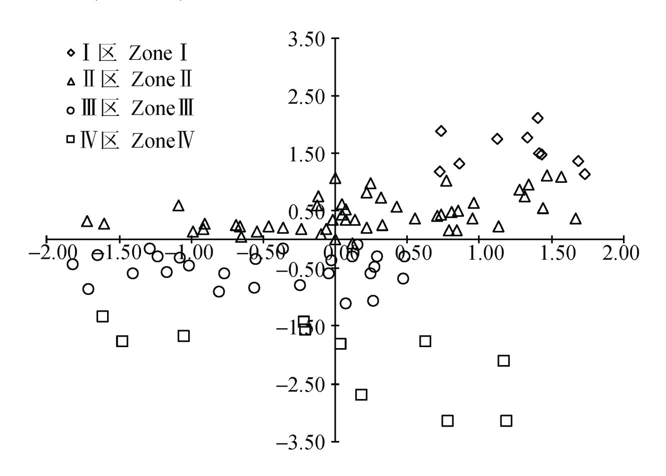


图 3 河北省不同冬小麦生产区产量与播种面积比重的关系

Fig. 3 Winter wheat yield and sowing area proportion relationship in different production zones in Hebei Province

3 结论与讨论

本文以河北省冬小麦主产区 101 个县为研究单元，借助数理统计分析方法，分析河北省冬小麦生产空间格局及其控制因素的规律，研究结果如下：

河北省冬小麦生产格局：主产区主要集中在中南部平原地区，总体呈现出以高产区为中心向四周产量递减的趋势。高产区主要集中在石家庄市周边平原地区，产量稳定性良好，灌溉面积率大，化肥使用量高；低产区主要分布在河北中南部平原地区的周边地区，产量变异性大，灌溉面积率小，化肥使用量较少。

在冬小麦生产空间格局控制因素方面，灌溉面积和化肥使用量是影响冬小麦空间格局的最主要因素，与学者们[11–14]对河北省粮食空间格局的研究结果一致。其中灌溉面积是影响冬小麦生产格局的首要因素，同时也是影响产量的重要因素，高产区域灌溉面积率高达 95%以上。化肥使用量对空间格局的分布起次要作用，年降水量对空间格局的影响较小，间接说明灌溉弥补了降水量不足或降水量区域性变异的影响。另外，农药使用量对空间格局分布的影响不显著，说明病虫害发生与防治的区域性趋势不明显。

本研究还发现，主要分布在东北部低平原或沿海的海兴县、沧县、黄骅市、孟村、盐山县、涉县小麦产量很低，但却具有较高的播种面积，说明这些县播种面积可能不正常偏高，需要引起注意。而其他各县冬小麦播种面积与产量吻合较好，产量及各主要生产要素值比较高的县域产量稳定性好，种植比重也高，说明本省冬小麦布局现状基本合理。

本文以产量及其变异性进行河北省冬小麦生产格局分析，根据灌溉面积、化肥使用量、年降水量等生产要素所建模型能够解释冬小麦产量 68.5%的变异信息，能够反映出河北省冬小麦生产空间格局及其控制因素的合理规律，但也说明还有很大比例的信息还未可知，一些比较重要的因素还没有考虑，例如品种。在气候变化的背景下，温度、日照等气象要素均可能对当地冬小麦生产空间格局产生影响。本文假设品种、气象等要素的空间变化是随机的或与时间同步的，如假设品种更替和温度变化在各地随时间变化的差异性可以忽略。这些因素的变化究竟是否可以忽略，其影响到底有多大，我们将在后续研究中考虑进这些因素及其随时间的变化，并延长研究时效，对冬小麦生产空间格局的控制因素进行更全面地分析调查，从而使研究结果更可靠更具有科学性。

参考文献 References

[1] 杨永明，李宪松，宗义湘．河北省小麦生产变动及区域布局研究[J]．合作经济与科技, 2013(10): 8–9
Yang Y M, Li X S, Zong Y X. A research on wheat production and regional layout in Hebei Province[J]. Co-Operative Economy & Science, 2013(10): 8–9

[2] 姜会飞，潘学标，吴文良．中国小麦生产的时空变异及区域优势分析[J]．中国农业资源与区划, 2005, 26(5): 39–42
Jang H F, Pan X B, Wu W L. Space-time variance and zoning advantage analysis of China wheat[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2005, 26(5): 39–42

[3] 赵广才．中国小麦种植区划研究(一)[J]．麦类作物学报, 2010, 30(5): 1140–1147
Zhao G C. Study on Chinese wheat planting regionalization (Ⅰ)[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(5): 1140–1147

[4] 李明辉，周玉玺，周林，等．中国小麦生产区域优势度演变及驱动因素分析[J]．中国农业资源与区划，2015，36(5): 7–15
Li M H, Zhou Y X, Zhou L, et al. Comparative advantage changes of regional wheat production in China and analysis of influencing factors[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(5): 7–15

[5] 李克南，杨晓光，刘园，等．华北地区冬小麦产量潜力分布特征及其影响因素[J]．作物学报, 2012, 38(8): 1483–1493
Li K N, Yang X G, Liu Y, et al. Distribution characteristics of winter wheat yield and its influenced factors in North China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(8): 1483–1493

[6] 袁再健，许元则，谢栌乐．河北平原农田耗水与地下水动态及粮食生产相互关系分析[J]．中国生态农业学报，2014，22(8): 904–910
Yuan Z J, Xu Y Z, Xie L Y. Correlation among farmland water consumption, grain yield and groundwater dynamics in the Hebei Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 904–910

[7] 潘学鹏，李改欣，刘峰贵，等．华北平原冬小麦面积遥感提取及时空变化研究[J]．中国生态农业学报，2015，23(4): 497–505
Pan X P, Li G X, Liu F G, et al. Using remote sensing to determine spatio-temporal variations in winter wheat growing area in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 497–505

[8] 徐志宇，宋振伟，邓艾，等．近 30 年我国主要粮食作物生产的驱动因素及空间格局变化研究[J]．南京农业大学学报, 2013, 36(1): 79–86
Xu Z Y, Song Z W, Deng A, et al. Regional changes of production layout of main grain crops and their actuation factors during 1981–2008 in China[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2013, 36(1): 79–86

[9] 莫兴国，林忠辉，刘苏峡．黄淮海地区冬小麦生产力时空变化及其驱动机制分析[J]．自然资源学报，2006，21(3): 449–457
Mo X G, Lin Z H, Liu S X. Spatial-temporal evolution and driving forces of winter wheat productivity in the Huang-Huai-Hai Region[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(3): 449–457

[10] 王勇．黄淮海地区小麦生产布局演变研究[D]．北京：中国农业科学院, 2010: 24–56
Wang Y. The evolution of allocation of wheat production in Huang-Huai-Hai Region[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010: 24–56

[11] 王千，金晓斌，阿依吐尔逊·沙木西，等．河北省粮食产量空间格局差异变化研究[J]．自然资源学报，2010，25(9): 1525–1535
Wang Q, Jin X B, Ayituerxun·Shamuxi, et al. Space difference research of the grain production in Hebei Province[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(9): 1525–1535

[12] 张路路，张悦国，刘瑞卿，等．河北省粮食单产区域差异特征演变格局及动因分析[J]．水土保持研究，2011，18(2): 192–197
Zhang L L, Zhang Y G, Liu R Q, et al. Spatial disparity and dynamic evolution of grain yield per unit area and its driving factors in Hebei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(2): 192–197

[13] 白立佳，张路路，刘瑞卿，等．基于 ESDA 的河北省粮食单产空间格局变化研究[J]．农机化研究, 2012, 34(1): 18–24
Bai L J, Zhang L L, Liu R Q, et al. Regional difference research of grain per unit area yield in Hebei Province base on ESDA[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(1): 18–24

[14] 王玉倩．河北省粮食作物投入产出时空格局及影响因素研究[D]．石家庄：河北科技大学, 2013: 17–55
Wang Y Q. Input and output factors' spatiotemporal variation analysis of grain production in Hebei Province[D]. Hebei: Hebei University of Science and Technology, 2013: 17–55

[15] 刘中培，张光辉，严明疆，等．石家庄平原区粮食施肥增产对地下水开采量演变影响研究[J]．中国生态农业学报，2012, 20(1): 111–115

Liu Z P, Zhang G H, Yan M J, et al. Impact of fertilization and high grain production on groundwater exploitation in Shijiazhuang Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(1): 111–115
[16] 杜群, 欧阳竹. 淮北砂姜黑土区小麦单产变化及影响因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1434–1438
Du Q, Ouyang Z. Changes in per-hectare yield of wheat and related factors in Shajiang black soil region of the Huaibei Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(6): 1434–1438
[17] 吴普特, 赵西宁. 气候变化对中国农业用水和粮食生产的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 1–6
Wu P T, Zhao X N. Impact of climate change on agricultural water use and grain production in China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 1–6
[18] Zhang X Y, Wang S F, Sun H Y, et al. Contribution of cultivar, fertilizer and weather to yield variation of winter wheat over three decades: A case study in the North China Plain [J]. European Journal of Agronomy, 2013, 50: 52–59
[19] Xiao D P, Tao F L. Contributions of cultivars, management and climate change to winter wheat yield in the North China Plain in the past three decades[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 52: 112–122
[20] 河北省统计局. 河北农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005–2014
Bureau of Statistics of Hebei Province. Hebei Rural Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005–2014
[21] 邓国, 王昂生, 周玉淑, 等. 中国粮食产量不同风险类型的地理分布[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 210–215
Deng G, Wang A S, Zhou Y S, et al. Geographical distribution of China's grain yield risk area[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(2): 210–215
[22] 张文彤, 董伟. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013
Zhang W T, Dong W. SPSS Statistical Analysis and Advanced Tutorial [M]. Beijing: Higher Education Press, 2013
[23] 王西琴, 吴若然, 李兆捷, 等. 我国农业用水安全的分区及发展对策[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(10): 1428–1434
Wang X Q, Wu R R, Li Z J, et al. Agricultural water security zoning and developmental countermeasures in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(10): 1428–1434
[24] 宋亚路, 刘苏峡, 马英, 等. 土壤分层关键因子确定——以新乡实验农地为例[J]. 地理研究, 2014, 33(11): 2125–2134
Song Y L, Liu S X, Ma Y, et al. Determining key factors for soil stratification: A case study in the farmland of Xinxiang[J]. Geographical Research, 2014, 33(11): 2125–2134
[25] 杨吉, 苏维词. 基于系统聚类分析的天河潭区域环境污染程度评价[J]. 环境工程, 2016(8): 154–157
Yang J, Su W C. The environmental pollution degree assessment in Tianhe Lake area based on hierarchical cluster analysis[J]. Environmental Engineering, 2016(8): 154–157
[26] 牛创民, 温学飞, 王峰. 基于因子分析法的盐池县粮食生产影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 278–282
Niu C M, Wen X F, Wang F. Influence factor analysis of grain-production in Yanchi County based on factor analysis method [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(6): 278–282
[27] 杨威, 卢文喜, 李平, 等. 因子分析法在伊通河水质评价中的应用[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 113–114
Yang W, Lu W X, Li P, et al. Application of factor analysis method to the water quality evaluation of Yitong River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(1): 113–114
[28] 肖艳芳, 宫辉力, 周德民. 基于因子分析的苜蓿叶片叶绿素高光谱反演研究[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 3098–3106
Xiao Y F, Gong H L, Zhou D M. A study on the hyperspectral inversion for estimating leaf chlorophyll content of clover based on factor analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(10): 3098–3106
[29] 薛薇. 统计分析与 SPSS 的应用[M]. 3 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2011
Xue W. Statistical Analysis and SPSS Application[M]. 3rd ed. Beijing: China Renmin University Press, 2011
[30] 章文波, 陈红艳. 实用数据统计分析及 SPSS 12.0 应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006
Zhang W B, Chen H Y. Statistical Analysis of Practical Data and SPSS 12[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2006